中華農業研究（Jour. Agric. Res. China）43(2)：208～227（1994）

稻穀薄層乾燥模式研究[1]

陳 加 忠　　曹 之 祖[2]

摘要：薄層乾燥之基本資料對於穀物加工之乾燥與通風模擬作業十分重要。本研究進行稻穀臺農67號品種於35°C至60°C，五種相對濕度（10～50%）條件之薄層乾燥試驗。數量化乾燥數據係藉由標準相對濕度產生器之改良來進行量測。乾燥用熱風溫度與相對濕度係由兩股氣流混合控制而成。一股爲絕對乾燥氣體，另一股爲飽和氣流。利用時間控制器使電子天平於乾燥試驗暫停期間進行穀物重量量測作業。天平量測之訊號傳送至數據記錄器再轉換成穀物含水率。所量測之乾燥試驗數據以統計迴歸技術來評估四種薄層乾燥方程式的符合能力。相關係數與殘差圖被採用爲模式適稱性之比較標準。比較結果發現具有兩項指數函數的雙成份模式爲適合試驗數據之最佳模式，因此可推薦爲稻穀薄層乾燥之適用方程式。此模式之四參數與乾燥溫度，相對濕度之關係均已建立量化方程式。

關鍵詞：薄層、乾燥、模式。

國內農作物收穫時，大多具有高水份含量，因此必須加以乾燥以確保品質及避免霉害，由於乾燥設備的設計與乾燥能源之節省成爲國內農產品加工作業重要之課題。此外穀物在貯存階段由於周遭大氣環境之變化與穀物自身之生命現象等因素，必須藉由通風作業以維持品質。

由於農產品乾燥與通風作業中，其處理對象爲體積龐大之穀物，利用現有乾燥設備與穀倉通風裝置進行實驗研究往往受制於實驗材料與作業季節等限制，無法得到不同影響因素下之多次數據，因此研究人員往往應用數學模式以模擬穀物乾燥與通風作業中各作業因子對農產品水份與溫度之影響，再以此預測性良好之模擬模式作爲加工設備設計改良之依據。

農產品的乾燥與通風模擬研究中，通常建立數組包含熱傳與質傳方程式，這些公式必須包括（a）空氣與水蒸氣之物性，（b）穀物與空氣之熱傳，質傳關係，（c）穀物與周圍空氣溫，濕度之平衡關係，（d）農產品之吸濕去濕速率。

對於上述（a）、（b）兩項關係，依熱力學與熱，質平衡之基本原理可加以設定求解，然而（c）、（d）兩項關係則因農產品之本身性質而不同，必須以實驗方式加以建立。在（c）項中，穀物與周圍空氣之平衡關係即農產品平衡相對濕度（Equilibrium Relative Humidity, ERH），平衡含水率（Equilibrium Moisture Content, EMC）與溫度之關係，又稱爲 ERH／EMC 物性。在（d）項中農產品之吸濕與去濕速率，在乾燥通風作業通常以薄層乾燥之形式加以研究。即將穀物乾燥之厚層再細分爲許多薄層依序進行模擬作業。薄層乾燥方程式之常數稱爲乾燥常數（Drying constant）。

由上述說明可知在進行乾燥、通風模擬作業之基本條件在於建立農產品 ERH／EMC 物性和薄層乾燥之乾燥常數。國內的有關研究中 ERH／EMC 物性各影響因子與其適稱模式已有詳細之研

1. 臺灣省農業試驗所　研究報告第 1721 號。
2. 本所農業工程系副研究員、技士。臺灣省　臺中縣　霧峰鄉。

究[4,5,6,7]。但是薄層乾燥之物性卻尚未建立完善研究資料，因此國內於乾燥模擬研究[8]與通風模擬作業[9]中，穀物乾燥之相關物性皆引用國外之文獻。國內之相關研究僅有在定溫（40°C）下之高粱穗乾燥常數[2,3]與牧草乾燥之研究[1]。

以適當的數學模式來代表薄層乾燥中農產品含水率對乾燥時間之變化，在模擬作業上十分重要。有關薄層乾燥之模式主要有兩種：分佈模式（Distributed model）與團塊模式（Lumped model）前者結構複雜，但可用以說明穀粒內部水份之分佈，並可判別乾燥常數與乾燥溫度對穀粒自身含水率影響關係[20,27,35]。後者爲經驗公式，形式簡單，預測性能良好，因此爲大多數研究者所採用。對多數研究者而言，往往以數組模式以評估其對實驗數據之最佳模式，其判別標準係利用相關係數（R）爲基準，而缺乏迴歸分析之基本原理評估。以高粱穗乾燥模式研究中，陳等已證明各種慣用之薄層方程式，僅爲乾燥曲線（含水率對乾燥時間）之直線化而已[4]，在判別模式之適稱性必須利用迴歸分析之檢定技術（如殘前差圖），方有學理之依據。

研究者由不同之乾燥條件（熱風溫度，相對濕度，風速，最初含水率等）下可得其特定乾燥常數，再綜合評估各參數與其影響因子之迴歸關係式，因研究方法及材料之不同，其結果差異極大。以稻穀爲例，歐美各國與日本研究即不一致。適用國內稻穀之乾燥常數有自行建立之必要，其影響因子應加以探討。以此完整且準確之數據提供國內乾燥，通風等加工作業之研究參考。此研究之目的如下：

1. 建立薄層乾燥設備實驗裝置，進行國內稻穀乾燥常數試驗研究。
2. 評估適用之乾燥曲線數學模式。
3. 探討乾燥常數與各影響因子之量化關係。
4. 比較此研究結果與文獻資料之異同處。

薄層乾燥模式

一、模式之建立

對於薄層乾燥試驗之穀物含水率與乾燥時間之關係繪製而成之曲線稱爲薄層乾燥曲線，用以描述此關係曲線之數學模式主要有三型[37,41]：

㈠包含質傳與熱傳之模式。

㈡擴散模式（Diffusion model）或稱分佈模式（Distributed model）。

㈢經驗模式（Empirical model）或稱團塊模式（Lumped model）。

由於經驗模式具有準確，簡易之特點，因此爲大多數研究人員加以採用。其最簡單之型式係基於乾燥率與乾燥潛勢具有比例之關係，並假設整粒穀物之含水率爲均勻整齊。

$$\frac{dM}{dt} = -k \cdot (M - Me) \quad \cdots\cdots (1)$$

M：農產品之整粒平均含水率，通常爲乾基（d. b.）

t：乾燥時間，單位爲小時（hr）或分鐘（Min.）

k：乾燥常數，（1／hr 或1／Min.）

Me：平衡含水率（d. b.）

由公式（1）可求解

$$MR = \exp[-k.\ t] \quad \cdots\cdots (2)$$

$$MR = \frac{M - Me}{Mi - Me} \quad \cdots\cdots (3)$$

MR 爲穀物水份比，Mi 爲 t=0時最初含水率。

公式 (2) 在實測值的驗證上僅有少數農產品如新鮮牧草方能適用[34]，而另一項型式類似修正公式係源自擴散模式之修正公式：

$$MR = A1 \cdot Exp\ (-B1 \cdot t) \quad \cdots\cdots (4)$$

A1 與 B1 爲常數，以下之公式參數皆爲常數。

Page[33]氏在進行玉米粒的乾燥試驗中，增加另一參數 N 值於公式 (2) 以增加數據對模式的適稱能力，此 Page 經驗公式爲：

$$MR = exp\ (-k \cdot t^n) \quad \cdots\cdots (5)$$

針對玉米粒的乾燥，Thomson 氏等人[46]提出另一經驗公式：

$$t = A_2 \cdot In\ MR + B_2 \cdot (In\ MR)^2 \quad \cdots\cdots (6)$$

Wage 氏等[47]則針對單層穀粒之乾燥試驗中提出如下經驗公式：

$$MR = 1 + A_3 \cdot t + B_3 \cdot t_2 \quad \cdots\cdots (7)$$

Noonhorm 氏等人[31]在穀物乾燥中認爲乾燥常數 (K) 與含水率 (M) 有線性關係。

$$K = b_1 \cdot M + c_1 \quad \cdots\cdots (8)$$

以公式 (4) 與 (8) 推衍出另一項經驗公式

$$t = [In\ a_1 - In\ M] / b_1\ M + c_1 \quad \cdots\cdots (9)$$

此外，Sharaf-Eldeen 等人[42]認爲穀粒之成份爲多層組成，因此提出多項指數函數以說明農產品乾燥曲線，對玉米而言，其經驗公式爲：

$$MR = A_4\ Exp\ [-B4 \cdot t] + (1 - A_4)\ Exp\ [-B_4 \cdot K_4 \cdot t] \quad \cdots\cdots (10)$$

Sharma 氏等[44]認爲稻穀基本上可分爲爲兩部份：稻殼與糙米，因此其乾燥公式則修正稱爲兩成份模式，此模式包括兩項指數與函數。

$$MR = A_5 \cdot Exp\ [-B_5\ t] + A_6 \cdot Exp\ [-B_6\ t] \quad \cdots\cdots (11)$$

此觀念與公式由 Ezeike 等人[21]所採用，用以分析西瓜種子之乾燥作業。在小麥之研究中，森本等人[16]亦採用此模式。

由於 MR 計算涉及平衡含水率 (Me) 之計算公式，亦有研究者在缺乏 EMC 模式資料時，以 Me 爲變數，將經驗公式以各種非線性方程式之型式加以修正，如 Byler 氏等人[18]，對蒸煮米 (Parboiled rice) 之乾燥曲線以如下公式表示：

$$M = \sum_{i=1}^{n} Pi\ exp\ [P_{2i} t) + Pn + 1 \quad \cdots\cdots (12)$$

其最佳方程式之 n 值爲4。

Moreira 等人[29]亦利用此非線性公式提出杏仁 (Almonds) 之乾燥曲線公式爲：

$$P_2 = P_1\ exp\ (P_2 +) + P_3\ exp\ (P_4) + P_5 \quad \cdots\cdots (13)$$

其 n 值則爲2。

二、模式之選擇

由於多項乾燥曲線之經驗公式已被提出，對於特定農產品之最佳乾燥模式選定大多僅以統計上之迴歸技術加以計算乾燥公式適稱 (Fitting-agreement) 性之量化值 (如相關係數 R^2 值或標準差) 。近年來，殘差圖已逐漸被採用以判斷模式之合理性[16,18,29,32,44]。在文獻搜尋中，大多數研究結果採用 Page 修正式；例如，Agrawal 氏等人[17]應用於稻穀，Chninnan 氏等人[19]應用於帶殼胡桃[19]，Hanson 氏等人[22]採用於 Taxus 藥草，Hutchinson 氏等[22]對大豆與白豆之試驗，Kulasiri 氏[25]等

人應用於落花生乾燥，Li 氏等用以解釋玉米粒[26]，油性向日葵種子[27]之乾燥特性，Muhidong 氏等[30]對 Kenaf 作物之研究，Osborn 氏等[32]對大豆之研究，Pathak 氏等人[38]用以解釋油菜種子之乾燥，Radjewski 氏等[39]等對 Navy beans 之研究，Shatadal 氏等[40]對 Canola 之研究，Syarief-Eldeen 等人[41]對葵花子，Tang 氏等[45]對扁豆與 White 氏等人[48]對大豆之乾燥之研究。由上述之結果可知，Page 經驗式之利用作物以帶油性之農產品爲多。

由於公式（11）兩部份模式之假設要點在於針對具有多層成份的農產品，因此帶殼或由不同成份組之農產品其適用性最佳，例如森木等人[16]對小麥之研究，Sharaf-Eldeen 氏等人[41]應用於玉米穗軸與 Ezeike 氏等[21]應用於西瓜種子。對於以 Me 爲變數之非線性公式（12）與（13）亦包含此多層成份概念，因此 Parboiled rice 與 Almonds 之乾燥最佳模式均屬於此型[18,29]。

三、稻穀之薄層乾燥

稻穀之薄層乾燥試驗在日本與歐美已有多篇研究，但其結果並未一致。中馬豐等人[11]所研究之薄層乾燥模式以公式（2）爲主，其建立 B_1 值與乾燥溫度（T_k）之關係具有 Arrhenius 型式，此式型式如下：

$$B_1 = b_0 * \mathrm{Exp}\left[-b_1 / T_k\right] \quad \cdots\cdots (14)$$

b_0 與 b_1 常數。

村田氏等人[13]所研究結果認爲公式（4）爲最佳模式，而公式（4）中之 A_1 值爲常數，B_1 值如同公式（14），具有 Arrhenius 型式，而 b_0 與 b_1 均與乾燥熱風之相對濕度數值具有線性關係。

大塚氏等人[11]提出之薄層方程式類似 Page 模式（公式5）之修正公式：

$$MR = 1 - \exp\left[-(k_1 \cdot t)^{n_1}\right] \quad \cdots\cdots (15)$$

k_1 與 n_1 則爲溫度，平衡含水率，穀溫等函數。

本橋氏[12]等人則將稻穀乾燥分爲二階段，恆率乾燥與減率乾燥第一期合爲一階段，減率第二期爲第二階段，各階段之乾燥公式均以公式（4）之指數函數爲代表。龜岡氏[15]則將乾燥期分爲三階段，自乾燥開始至10分鐘爲第一階段，10分鐘至2小時爲第二階段，2小時後爲第三階段，三階段曲線各以公式（4）爲代表，三公式中 Ai 值爲常數，Bi 值爲溫度之函數。

在西方之研究中，Agraval 等人[17]則選用 Page 公式以說明稻穀之乾燥曲線關係，k 與n 爲溫度與相對濕度之函數。Wang 氏[47]則提出經驗公式（7），而參數 A3 與 B3 各爲溫度，相對濕度之指數乘積函數。Noom horm 氏[31]所提出之公式則以35～55°C爲低溫，55～75°C爲高高溫加以區分，以公式（9）爲最佳模式，然而其參數 a，b 與 c 之關係函數則十分複雜。

四、薄層乾燥公式之迴歸曲線意義

在統計學迴歸分析技術中，爲使曲線能線性化，通常以取對數或加以開方加以縮小數據差距[47]。對於大多數之經驗乾燥模式，模式本身經線性化後可知其僅爲曲線函數轉化（transfer）爲線性化（linear ized）之特殊公式，如公式（4）可轉換爲：

$$\ln MR = \ln A_1 - B_1 * t \quad \cdots\cdots (16)$$

公式（5）之轉換式爲

$$\ln(-\ln MR) = \ln K - N * \ln t \quad \cdots\cdots (17)$$

公式（6）爲 t 與 lnMR 進行多項式迴歸分析中，省略常數項之迴歸技術，公式（7）爲MR 與 t 之多項迴歸。而日人大塚氏等人[10]所提出之修正式（15）亦可轉換爲：

$$\ln(-\ln(1-MR)) = K \cdot N + N \cdot \ln t \quad \cdots\cdots (18)$$

由此可知大多數之經驗公式其統計意義僅爲曲線之線性化以增加模式對量測數據的適稱能力。唯

有以多層成份爲假設條件之經營公式（10）或（11）則較有學理之意義。

五、薄層乾燥之成立條件

進行薄層乾燥時，穀粒之堆積厚度與所用風量十分重要，由龜田氏之研究中[14,15]，穀粒厚度自在0.7，1.7cm 與2.7cm，風量爲20～40m^3/hr（風速0.2～0.4m／s）之六種乾燥曲線並無差異存在。因此可知風量高於特定值後，風量或風速對乾燥曲線之影響即可忽略。Noomhorm 氏等[31]對穀粒的薄層乾燥試驗結果發現風量對乾燥常數之影響極小而可忽略，Hutchinson 氏（23）等對於豆類乾燥之研究中，亦發現風速並非有效之影響因子。

在穀物薄層乾燥之研究中，主要之控制因子爲熱風溫度，而相對濕度受大氣氣候之影響而無法控制[11,12,13,15,17,47]，僅有 Noomhorm 氏等[31]之研究，對相對濕度加以控制。因爲實驗設計之不確立，影響模式參數影響因子的量化評估。在此研究中，爲探討熱風的溫度與相對濕度之影響，以溫度與相對濕度同時控制之方式來探討薄層乾燥物性。

設備與方法

一、研究所用設備

此薄層乾燥所用實驗裝置如圖1所示，係利用 Shinyei 型相對濕度校正器改良而成，原設備係用以設定與產生恆溫恆濕氣流，以做爲相對濕度計校正之用，此研究中利用其控制設備以產生乾燥空氣氣流進行薄層乾燥試驗。

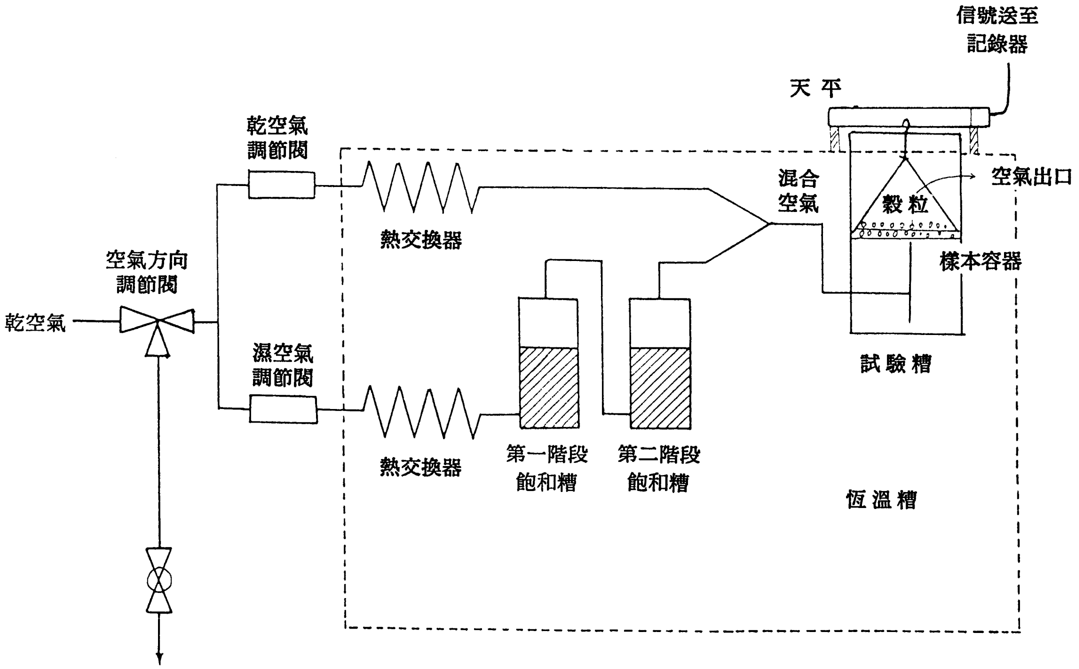

圖1. 薄層乾燥實驗裝置

Fig. 1. Schematic of thin•layer drying device

空氣係利用空壓機產生壓力以傳送氣流，在進入此實驗裝置之前，利用固態除濕機以去除空氣水氣以達到絕乾效果。除濕機之吸水物質以內部循環方式在未接觸外空氣部份以電能加熱之空氣加以再生，以確保其除濕能力。乾空氣進入實驗裝置內，以兩具調節閥分別調整乾、濕空氣流量。濕空氣依序通過第一階段與第二階段之飽和槽成飽和狀態。兩股空氣混合成為預定之濕氣比。因上述過程均在恆溫槽內，因此溫度十分穩定。此實驗裝置內有微電腦設備，使用者除依此設備所附使用表，依所需溫濕度對乾濕球調節閥流量加以設定之外，微電腦自動以微調方式加以調整所需流量以確保氣流之溫、濕度準確性，此試驗裝置所產生之氣流其控制準確度依規格書說明約為±0.15°C，與±1.5% RH。

試驗裝置內有試驗用槽，此用以懸吊乾燥穀粒，樣本容器與周壁之間隙極小，以確保乾燥空氣皆能通過穀粒，通過穀層之氣體自旁側流出機體之外。

穀粒容器成圓盤型，底部為細目網，實驗時穀粒放置於其上面成均勻分佈，約為一粒或兩粒，樣本容器以吊勾掛於稱重天平下方與熱風方向垂直。

為避免熱風的浮力干擾穀重的量測，此基本試驗裝置另行裝設時間控制器，以間斷方式進行乾燥作業，每次乾燥以十分鐘為一周期，熱風通過穀層為九分五十秒，再有十秒成停滯狀態，在此十秒內電子天平訊號傳送至記錄器以記錄穀重。

稱重天平之量測範圍調整為0～1kg，準確性至0.01g，量測值以類比訊號輸出（0～2v，精確性為1mv），以 DELTA-L 型記錄器加以記錄。

乾燥過程中，氣流之流速調整為0.3m／s，風速計以 Sweta～30熱線型風速計加以量測準確性0.01m／s。溫度量測利用 RTD Pt～100元件，準確性0.1°C，相對濕度係以Rotronic I～100型量測，準確性1.0% RH。對於通過穀粒之熱風量測結果，其溫度控制誤差為±0.2°C，相對濕度控制誤差為±2.0%，風速之控制誤差為0.05m／s。

二、測定穀物

此試驗所用稻穀品種為臺農67號，產於農業試驗所實驗農場，最初含水率約34～36%乾基（此研究含水率均以乾基表示）。自田間運回後先加以風選與篩選以去除雜質，再密閉貯放於3°C之冷藏庫，實驗進行前再放置室溫24小時左右以回溫。

三、試驗方法

此試驗中所用乾燥熱風溫度設定各為35，45，50與60°C相對濕度設定為10，20，30，40與50% RH，共有20種組合，風速依已知文獻調整為0.3m／s，因此在此研究中不考慮風速之影響。每種組合試驗次數為2～3重覆，試驗所用時間與最後含水率如表1所示。

表1. 薄層乾燥之實驗設計

Table 1. Experimental design for thin-layer drying

Drying Temp	EMC (%, d, b)					Final	Drying time
	Relative Humidity (%)						
(°C)	10	20	30	40	50	m. c.	(Hr)
35	4.6	6.1	7.4	8.6	9.9	10 ～11 %	22.0
45	4.4	5.8	7.0	8.2	9.4	9.0～10 %	10.0
50	4.3	5.7	6.8	7.9	9.1	9.0～11 %	7.0
60	4.0	5.3	6.4	7.5	8.7	8.0～ 8.5%	5.5

試驗前先啓動裝置，熱機約一小時，再將穀粒盛於樣本容器之內，容器懸掛於天平下方，啓動記錄器加以記錄。穀物於乾燥前後以烤箱測含水率，由含水率與穀粒重量之變化可計算乾燥過程中穀粒含水率的變化。含水率的量測係以烤箱乾燥，所用溫度爲105°C，時間72小時。

四、試驗統計分析

每組穀粒含水率與乾燥時間之關係數據，由最初含水率（Mi）與平衡含水率（Me）值可計算水份比 MR 值。所用之 EMC 公式依陳氏[3]等人之研究，採用修正 Oswin模式：

$$Me = (11.565 - 4.8643 \times 10^{-1} * T) * \left(\frac{RH}{1-RH}\right)^{0.347} \cdots\cdots (19)$$

T：熱風溫度（°C）

RH：熱風相對濕度（小數點）

評估之適用模式係選擇指數模式（公式4），Page 經驗式（公式5），Wang 氏多項式模式（公式7）與雙成份模式（含兩項指數函數，公式11）。前兩項公式之自變數經線性轉換後（公式16，17）與原 MR 之數值相異，在迴歸分析之模式適合性比較中，以標準差加以比較即不合理，因此此研究採用之量化標準僅爲相關係數平方 R2 值，定性標準則爲殘差圖。繪製模式殘差值對預測值之分佈，若殘差均勻分佈則表示此模式十分適切，若殘差成規律分佈則表示此模式並不適當[47]。公式4，5，7採用 "Multreg" 程式（複迴歸程式）進行線性迴歸分析，公式11則利用 QBASIC 語言所撰寫〝TWOCOM〞程式（雙成份程式）加以計算參數與其他統計量。

模式中各參數與乾燥條件（熱風溫度，相對濕度）均以複迴歸技術建立其關係式，此關係式假設條件係包括溫度，濕度之平方項與溫度、相對濕度的交乘效應，典型之假設模式如下：

$$Ki = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + b_1RH + b_2 RH^2 + b_3 RH^3 + C_1 T \cdot HR \cdots\cdots (20)$$

公式(20)模式有顯著意義之係數選擇係利用迴歸核定技術之 C_p 與 t-test 以量化比較其影響力[3]。

結果與討論

一、薄層乾燥方程式比較

典型之乾燥曲線以圖 2 爲例，乾燥條件爲35°C，50% HR，水份比 MR 值隨乾燥時間而降低。以線性迴歸與非線性迴歸技術對此乾燥時間與含水率之數據分析之結果如下：

(一)指數模式：

$$MR = 1.225\ Exp\ [-1.348 \times 10^{-3} \cdot t] \cdots\cdots (21),\ R^2 = 0.941$$

(二)Page's 模式

$$MR = Exp\ [-0.0162\ t^{0.706}] \cdots\cdots (22),\ R^2 = 0.978$$

(三)Wang's 多項式

$$MR = 0.87 - 1.908 \times 10^{-3}t + 1.215 \times 10^{-6}t^2 \cdots\cdots (23),\ R^2 = 0.982$$

(四)雙成份模式

$$MR = 0.954\ Exp\ [0.2544 \times 10^{-3}] + 1.592 \times 10^{-2} Exp\ [-1.6 \times 10^{-3} \cdot t] \cdots\cdots (24),\ R^2 = 0.992$$

將迴歸所得之模式曲線與實測值加以比較於圖 2 ，雙成份模式對量測數據之適稱性十分良好，非線性迴歸之預測曲線與實測數據之符合性良好。指數函數（曲線 1 ）在最初 2 小時內預測值均低於實測值，而 2 小時後預測值則高於實測值，18小時後又低於實測值，Page's 模式（曲線 2 ），於乾燥初期有輕微低估現象，在12小時內則有高估現象，第12小時後有嚴重低估現象。Wang 氏多項式模式對實驗數據有先高估，再低估而後又顯著高估之現象。

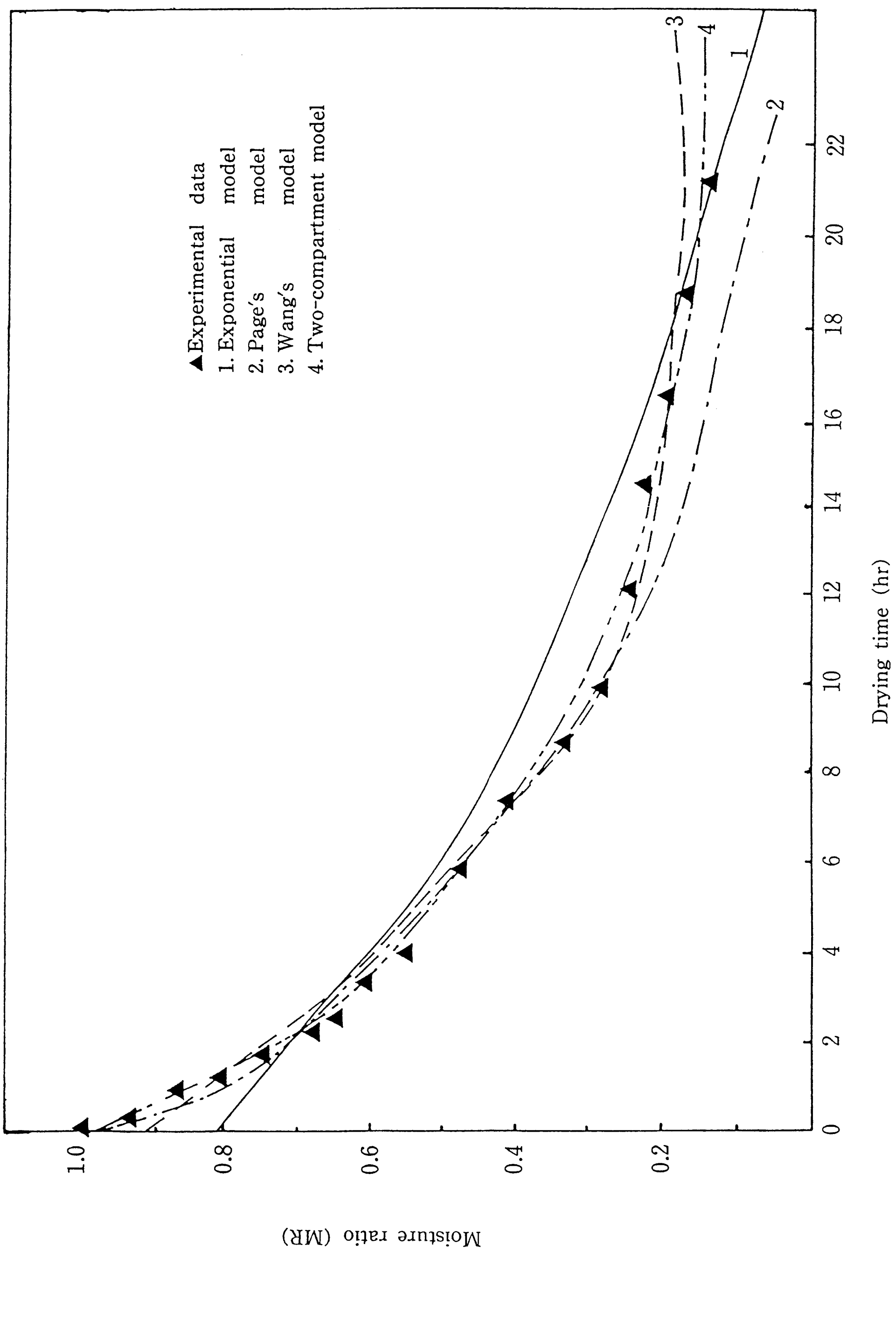

圖2. 35°C與50% RH 之乾燥量測值與四預測模式

Fig. 2. Drying data and four prediction models at 35°C and 50% RH

四模式之迴歸分析殘差值對預測值之殘差圖如圖 3a 至 3d 所示。三項線性模式：指數模式，Page 氏模式與 Wang 氏多項式均有顯著之曲線分佈現象，此模式殘差成規則性之分佈即代表預測模式對實驗數據之解釋已存有固定之誤差值，而此種固定誤差係源自模式自身無法解釋量測數據。圖 3 b 之殘差具有分佈均勻之特性，顯示此模式之預測誤差均為任意產生之誤差，並不具備規律性，對迴歸分性原理而言，代表模式良好之適稱性[47]。

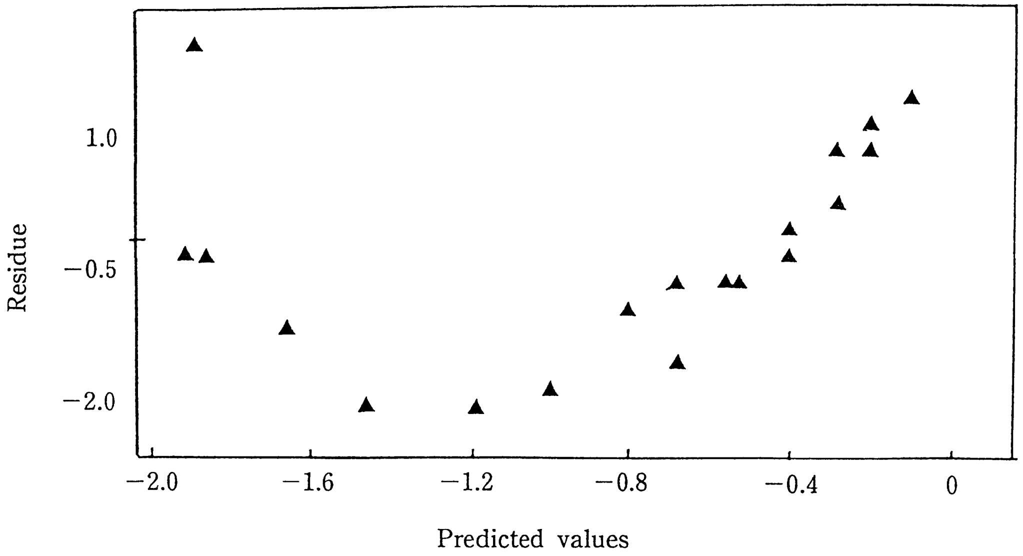

圖3a. 指數模式之殘差圖

Fig. 3a. Residual plot of exponential model

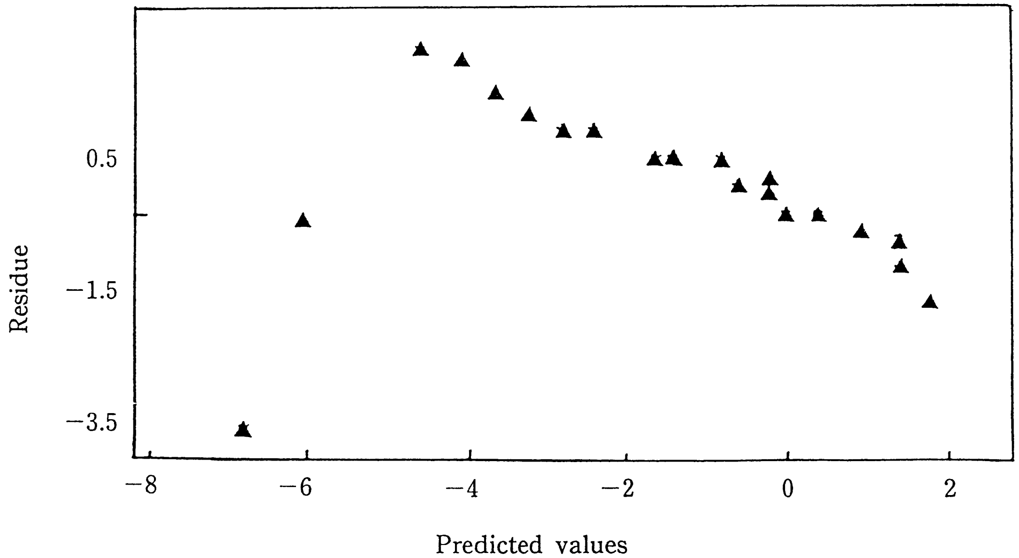

圖3b. Page 氏模式之殘差圖

Fig. 3b. Residual plot of page's model

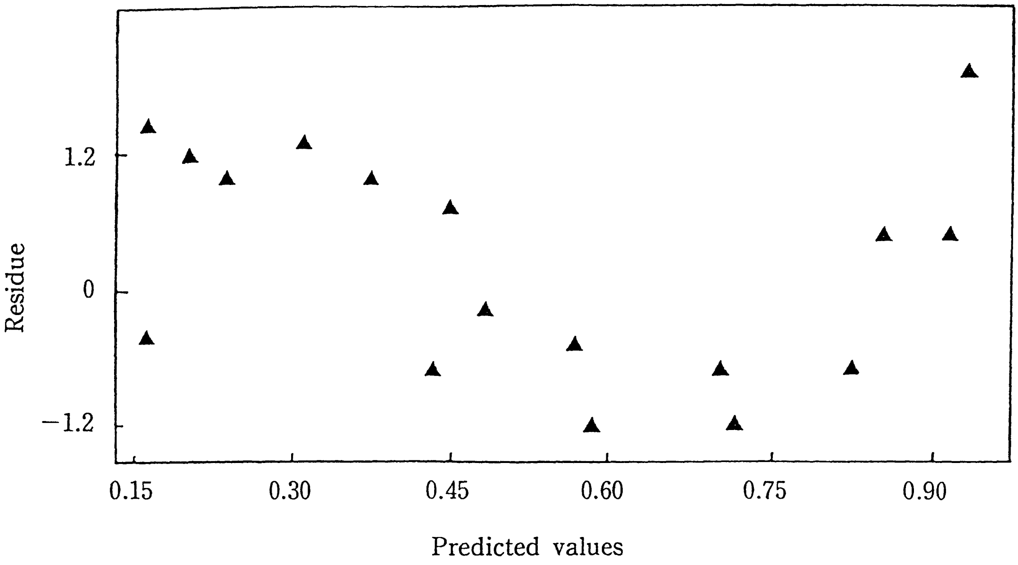

圖3c. Wang 氏多項式之殘差圖
Fig. 3c. Residual plot of Wang's model

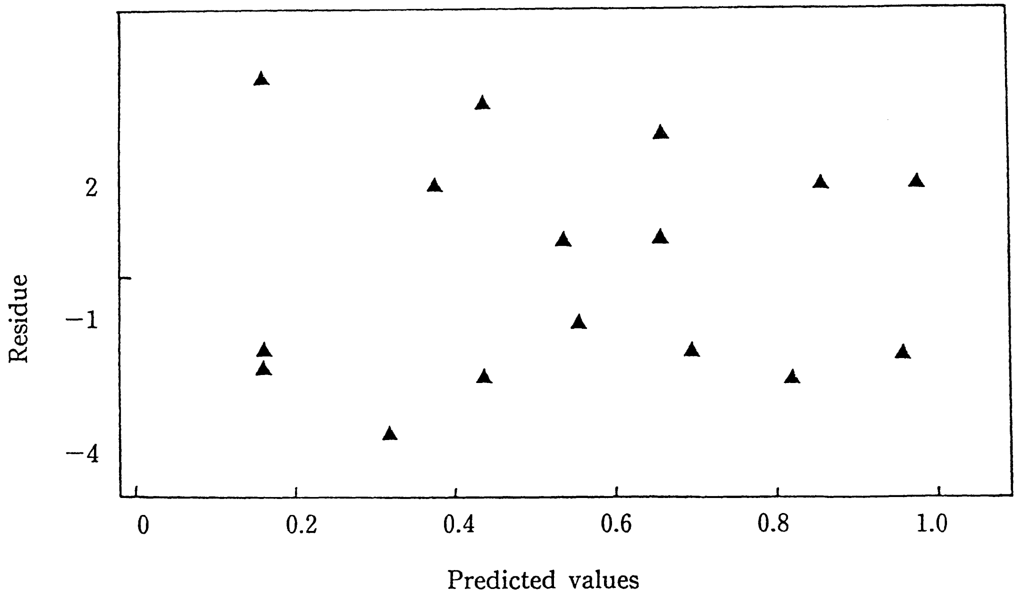

圖3d. 兩成份模式之殘差圖
Fig. 3d. Residual plot of two-compartment model

乾燥條件50°C，20% RH 之乾燥曲線量測值與四種薄層乾燥模式之預測曲線如圖 4 所示。二成份模式的預測能力亦是最好，曲線 (4) 與量測值十分符合。其餘三模式之預測曲線與量測值的差距雖然低於圖 2 之差距量，但其誤差之分佈規律性完全相同，如指數模式與量測值之誤差係先低估，2 小時後高估而 7 小時後又爲低估。Page氏模式則也低估，再高估而後低估。四模式之迴歸曲線殘差值對預測值之分佈現象亦與圖 3a～3d相似，顯示此乾燥曲線僅有二成份模式具有良好之符合性。

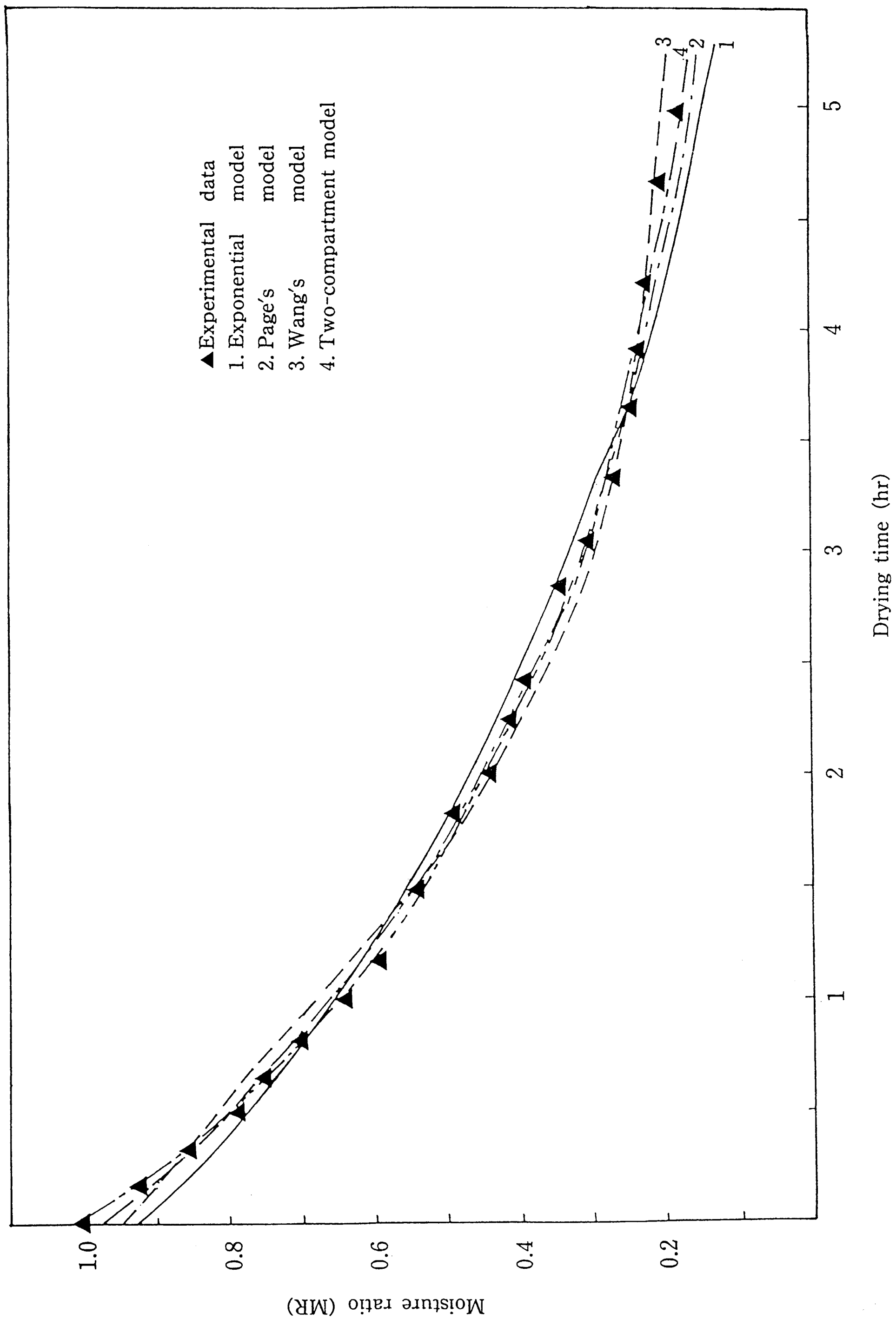

圖4. 50°C與20% RH 之乾燥曲線量測值與四預測模式

Fig. 4. Drying data and four prediction models at 50°C and 20% RH

對20組乾燥條件下各二重覆之四十組量測數據其迴歸分析之結果加以比較，其比對結果幾乎完全相同：兩成份模式皆具有最高之相關係數平方（R^2）值，其殘差分佈亦具有均勻分佈之特性。而其物理意義亦能說明稻穀本身爲複合體之特性。因此此包含兩項指數程式之模式爲值得推薦爲稻穀薄層乾燥之最適當公式。

二、乾燥常數之影響因子

以四十組數據，每一組數據以公式(11)進行複迴歸分析所得之模式常數A5、B5、A6、及 B6值，與各組數據之乾燥條件(溫度 T，°C與相對濕度，RH值)進行分析。A5、B5、A6與B6參數對溫度之分佈圖形如圖 5a、5b、5c 與 5d 表示，A5與 B5參數對相對濕度之分佈如圖 6a 與 6b 所示，由分佈圖中無法歸納出簡單之規律性，因此以公式(20)，包含 8 項常數項之公式以建立各乾燥常數與乾燥條件之量化關係，並取 Cp 值用以選擇適當的模式，並以 t 檢定，檢查各一參數是否顯著，所得結果如下：

$$A5=0.99556+2.4415\times10^{-3}\cdot T-1.4485\cdot RH+1.659\times 10^{-4}\cdot T^2+0.01\cdot RH^2 \quad (25)，R^2=0.85$$

$$B5=-8.6588\times10^{-4}+0.02391\cdot T+3.383\times10^{-6}T^2-6.2341\times10^{-4}\cdot T\cdot RH \quad (26)，R^2=0.71$$

$$A6=0.7247-3.3217\times10^{-2}\cdot T+3.7\times10^{-4}\cdot T^2+0.639\cdot RH-1.336\times10^{-2}\cdot T\cdot TH \quad (27)，R^2=0.65$$

$$B6=-6.068\times10^{-3} \quad (28)$$

以敏感性分析探討參數 T 與 RH 之誤差對於 A_5，B_5，A_6 與 B_6 值之準確性影響，所用公式爲

$$Ei=\left[\left(\frac{\partial X_i}{T}\triangle T\right)^2+\left(\frac{\partial X_i}{RH}\triangle RH\right)^2\right]^{0.5} \quad (29)$$

E_i 爲參數之不準確性，X_i 爲 A_i，B_i值。

以公式（29）計算所得各參數之不準確性（誤差性）以50°C，30% RH 爲例，表示如下：

A5=±1.9%，B5=±1.8%，A6=±1.5%

顯示乾燥條件 T，RH 之誤差值對參數 A_i 與 B_i 之數值影響不大。

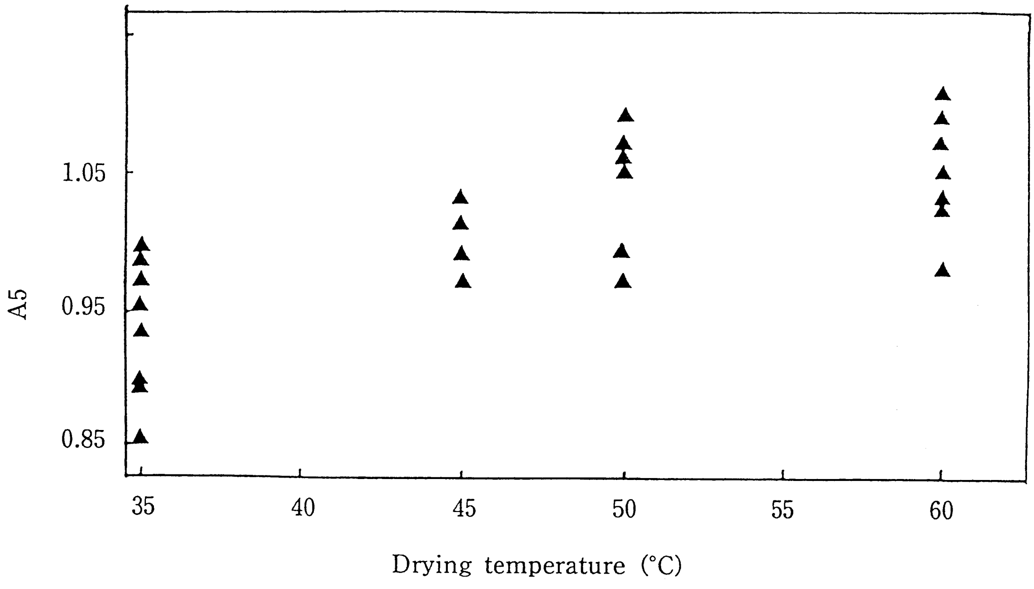

圖5a. 乾燥常數 A5 與乾燥溫度

Fig. 5a. Plot of drying constant A5 against drying temperatures

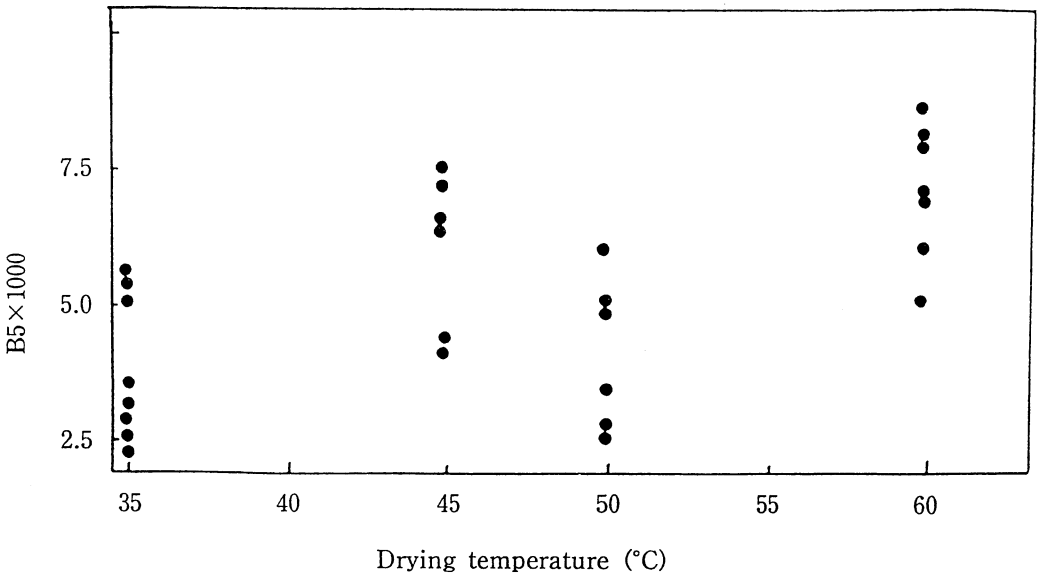

圖5b. 乾燥常數 B5 與乾燥溫度
Fig. 5b. Plot of drying constant B5 against drying temperature

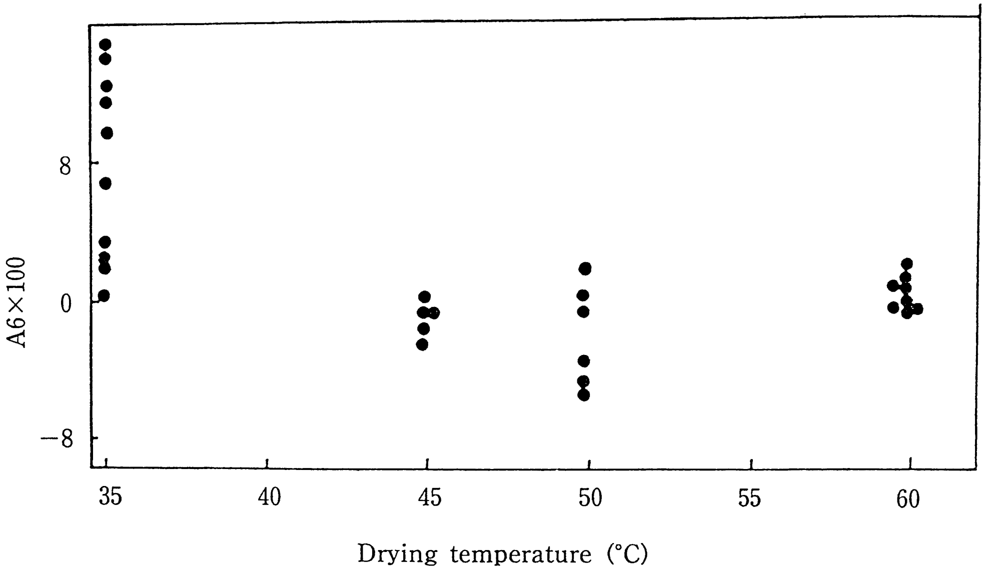

圖5c. 乾燥常數 A6 與乾燥溫度
Fig. 5c. Plot of drying constant A6 against drying temperature

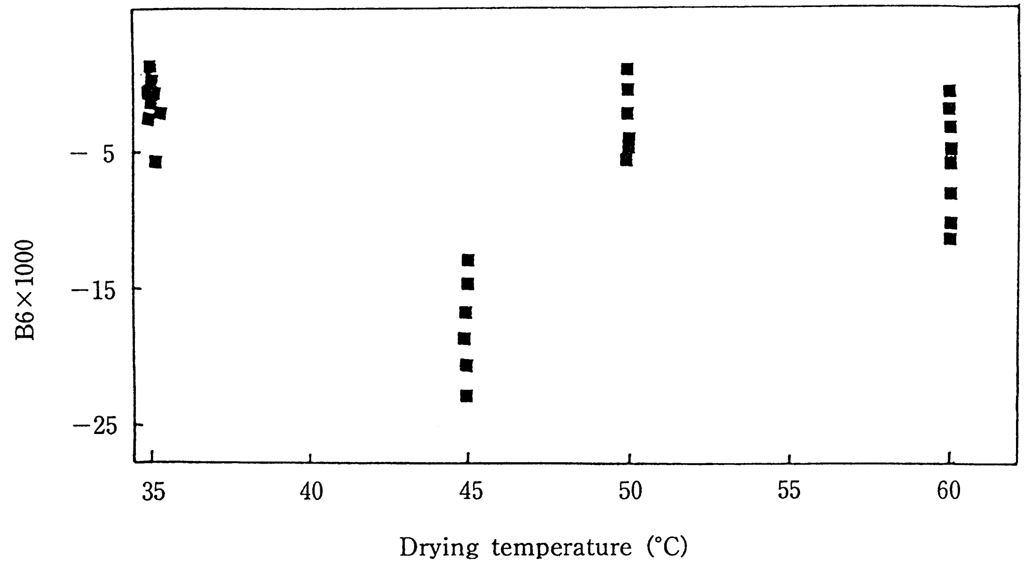

圖5d. 乾燥常數 B6與乾燥溫度
Fig. 5. Plot of drying constant B6 against drying temperature

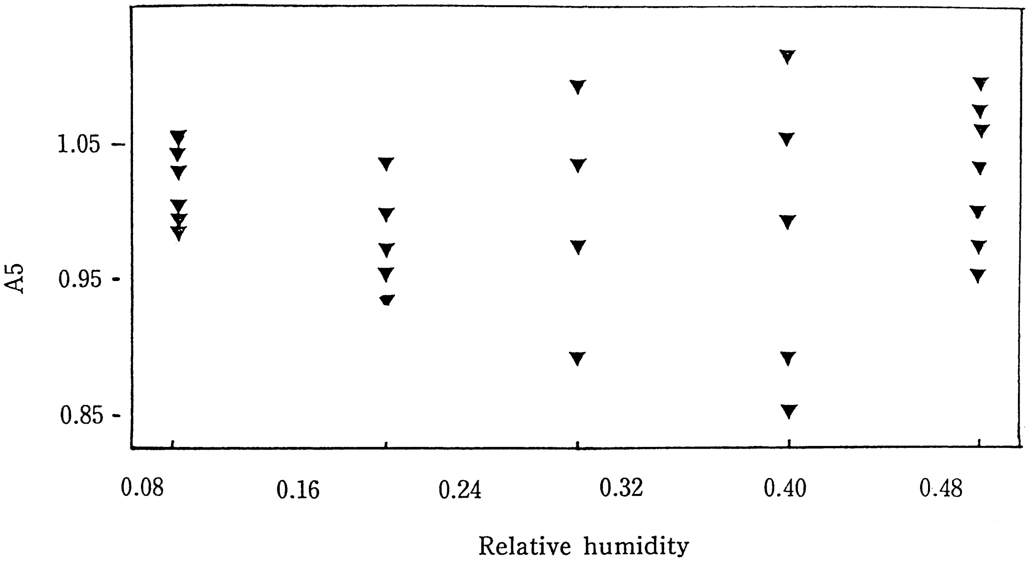

圖6a. 乾燥常數 A5 與乾燥相對濕度
Fig. 6a. Plot of drying constant A5 against drying relative humidity

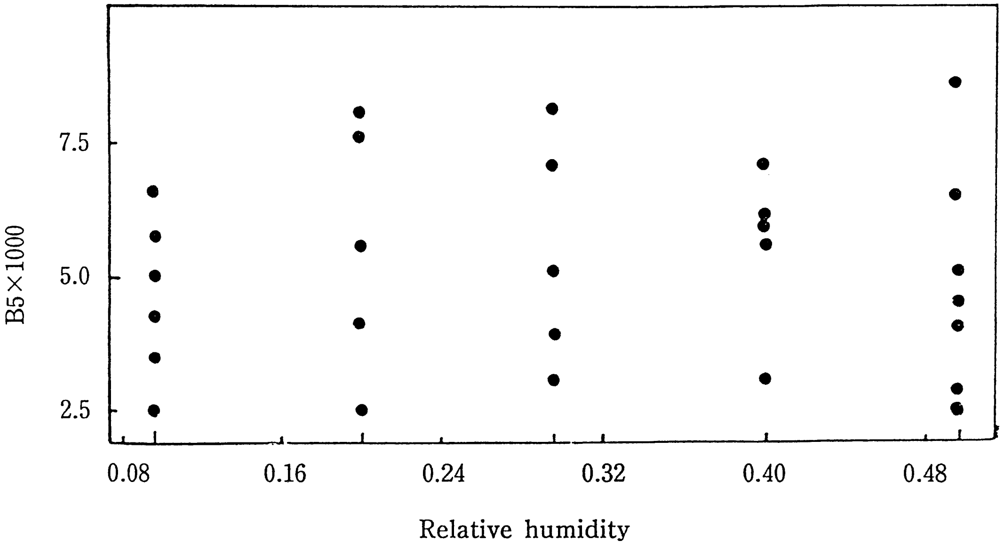

圖6b. 乾燥常數 B5 與乾燥相對濕度
Fig. 6b. Plot of drying constant B5 against drying relative humidity

三、與其他研究結果之比較

此研究結果與已知稻穀薄層乾燥已有文獻中之研究結果比較。Wang 氏等人[47]之研究其適用性僅限於最初之兩小時，此原因可由其模式型式與其試驗時間加以說明，因其乾燥研究僅局限前二小時之研究數據，此研究數據所求得之預測模式爲二次多項式（$MR=a+bt+ct^2$），而二次方程式本身具有最低點之特性，因此其預測方程式於兩小時後之應用已屬於外插範圍，MR 值反而隨時間增加而增加，此結果已不合乎物理意義，因此 Wang 氏之研究結果不被採用於此研究中加以比較：

六組薄層方程式之比較結果討論如下，共包括：1. Noongorm 等人[31]，2. Agraval 等人[17]，3. 中馬豐等人[11]，4. 村田敏等人[13]，5. 龜岡氏[15]與6. 此研究結果。

圖 7 代表在35°C，50% RH 之 6 組 MR 對乾燥時間之乾燥曲線。曲線 3 ，中馬豐等人之研究中，其 MR 曲線偏離其他五組曲線，而有三組曲線（1. Noomhorm等人，2. Agraval等人，3. 村田敏等人）其 MR 預測值在相同乾燥時間均低於此研究結果之預測值。龜田氏之研究結果所得曲線 5 與此研究結果則較爲接近，在乾燥時間 5 小時之前，龜田氏之預測 MR 值高於此研究之預測值，而 5 小時後則低於預測值，量化之 MR 差距約0.02。

乾燥條件50°C，20% RH 之六組 MR 曲線比較於圖 8 。曲線 1 （Noomhorm 等人之研究）則顯著偏離，遠小於其他曲線，在乾燥時間2.5小時時，MR 值趨近於零即代表近乎完成乾燥作業。其他三組 MR 曲線（2. Agraval等人，3. 中馬豐等，4. 村田敏等）之研究均低於此研究所得結果，而龜田氏之研究結果在2.5小時之前，低於此研究之結果，而在2.5小時後，兩組曲線（ 5 與 6 ）則十分接近。

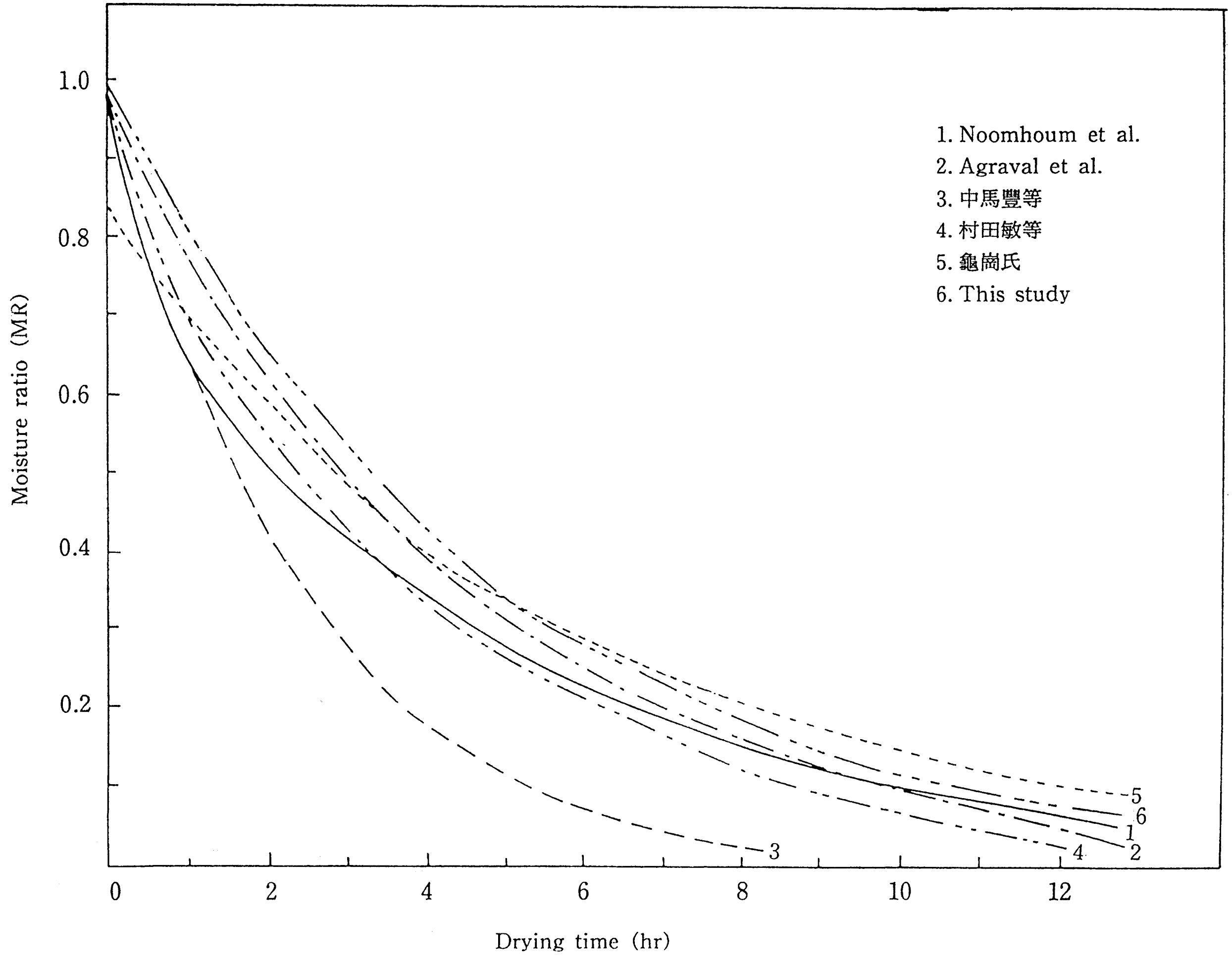

圖7. 35°C與50% RH 乾燥狀態之研究結果與其他文獻之比較

Fig. 7. Comparison of results of this study with result from previous literature at drying condition of 35°C

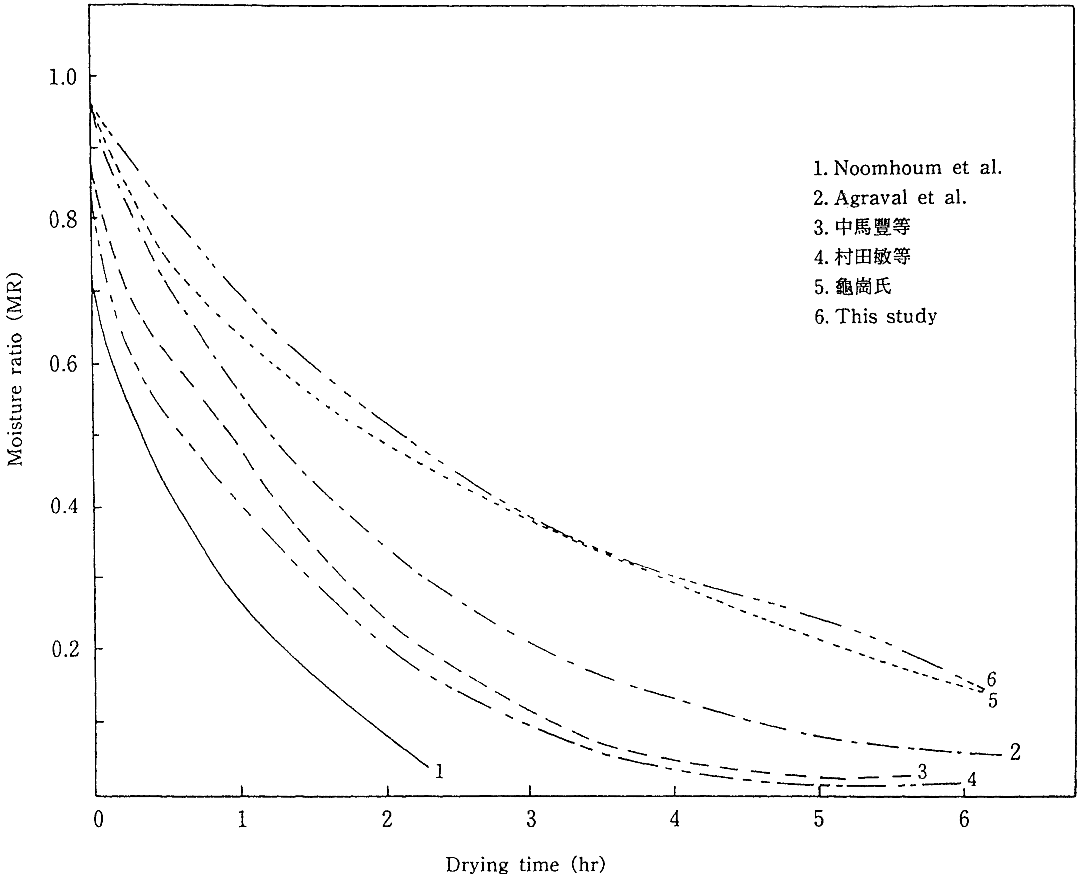

圖8. 50°C與20% RH 乾燥狀態之研究結果與其他文獻之比較

Fig. 8. Comparison of results of this study with result from previous literature at drying condition of 50°C

圖 7 與圖 8 之比較結果可知，不同之文獻其乾燥曲線方程式之預測值差異極大，此原因十分複雜：乾燥所用品種之不同，量測設備準確性限制與數據之統計分析技術之不同均是造成乾燥曲線差異性之原因。而在量測技術方面，除了 Noorhorm[17]氏等人之研究有涉及相對濕度之量測，其他多數之研究結果均未涉及相對濕度之影響因子。此研究結果發現除了乾燥溫度之外，熱風相對濕度值亦爲影響乾燥常數數值之重要因子，因此實驗設計之周延性與否，應爲影響乾燥曲線預測性之主要因子。國內在穀物乾燥機與穀倉加工作業之模擬作業中均採用國外的文獻，而由此研究結果可知，國外稻穀之薄層乾燥特性與國內品種之特性有顯著之差異預測，MR 差異值可高達0.10。此差異特性對模擬作業之影響應爲未來研究之方向。而此研究所得之最佳薄層方程式：兩成份模式與模式各參數對乾燥條件之量化公式可提供爲國內稻穀加工業者參考之有用資料。

結 論

由此稻穀薄層乾燥研究所得結果，顯示臺農67號品種於乾燥條件爲35～60°C，10～50% RH，風量0.3m/s 時四組薄層乾燥模式之適稱性比較以包含兩指數之兩成份模式（稻穀與糙米）對量測值之

適稱符合性最好，其模式物理意義可包括稻穀之主要組成成份。模式之四乾燥常數與熱風乾燥條件之溫度與相對濕度之量化關係亦已加以建立。此研究所得之稻穀薄層乾燥特性與其他國家之研究發現有顯著之差異，MR 預測值高達0.1之差異。此研究結果可提供國內稻穀加工作業中乾燥與通風作業模擬分析之參考資料。

引用文獻

1. 孔祥琴。1993。牧草乾燥特性之研究。碩士論文。臺大農機工程研究所。臺北。
2. 陳加忠、賴建洲、曹之祖、游祥芳。1989a。高粱穗之基本乾燥試驗。中華農業研究 38(2)：242—260。
3. 陳加忠、賴建洲、曹之祖。1989b。高粱穗乾燥模式之研究。中華農業研究 38(2)：261—275。
4. 陳加忠、賴建洲、曹之祖。1990。稻穀平衡相對濕度性能之研究。中華農業研究 39(4)：347—366。
5. 陳加忠。1992a。動態平衡含水率於玉米粒乾燥之評估。農業機械學刊 1(2)：38—45。
6. 陳加忠、曹之祖。1992b。玉米平衡相對濕度性之研究。農業工程學報 38(3)：86—97。
7. 陳加忠、曹之祖。1992c。大豆與兩種豆類平衡相對濕度物性之研究。農業機械學刊 1(4)：52—59。
8. 馮丁樹。1988。循環式稻穀乾燥機之係統模擬及其在個人電腦上之應用。行政院國科會專題研究計畫成果報告 NSC77—0409—B002—08。
9. 盧福明。1988。穀倉機械化作業之研究 V. 穀倉強制通風降低穀層溫度效果之模擬。中國農工學報 34(1)：53—60。
10. 大塚寬治、村田敏、中馬豐。1975。薄層稻穀熱風乾燥相關之實驗式。農機學會誌 37(3)：331—338。
11. 中馬豐、村田敏、岩元睦大。1969。有關穀類之基礎實驗。農機學會誌 31(3)：250—255。
12. 本橋田司、細川明。1979。稻穀乾燥之透氣乾燥理論之適用（II）農機學會誌 41(4)：593—601。
13. 村田敏、中馬豐、大塚寬治。1976。農產物貯藏庫之通氣與換氣關係式。農機學會誌 38(2)：233—238。
14. 龜岡孝治。1988。試作した實験用乾燥裝置との乾燥特性。農機學會誌 50(1)：47—52。
15. 龜岡孝治。1988。の薄層乾燥特性：
    第1報：農機學會誌 50(3)：69—76。
    第2報：農機學會誌 50(4)：57—65。
16. 森本進、豐田淨彥、竹內龍三。1991。小麥の薄層乾燥實驗式。農業施設 22(2)：87—94。
17. Agraval, Y.C. and R.D. Singh.1977. Thin layer drying studies for short grain rice. ASAE Paper No. 77-3531. St. Jophen, MI.
18. Byler, R.K., C.R. Anderson and R.C. Brook. 1987. Statistical methods in thin layer parboiled rice drying models. Trans. of ASAE 30：533-538.
19. Chhinnan, M.S. 1984. Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. Trans. of ASAE 27：610-615.
20. Ece, M.C. and A. Cihan. 1993. A liquid diffusion model for drying rough rice. Trans. of ASAE 36(3)：837-840.
21. Ezeiki, G.O.I. and L. Otten. 1991. Two-compartment model for drying unshelled melon (egusil) seeds. Canadian Agricultural Engineering 33：73-78.
22. Hanson, R.C., H.M. Keener and H.N. Elsohly. 1993. Thin-layer drying of cultivated Taxus clippings. Trans. of ASAE 36(5)：1387-1891.
23. Hutchinson D. and L. Otten. 1983. Thin-layer air drying of soybeans and white beans. J. of Food Technology 18：507-522.
24. Jayas, D.S., S. Cenkowski, S. Pabis and W. E. Muir.1991. Review of thin-layer drying and wetting equations. Drying Technology 9(3)：551-588.
25. Kulasiri, G. Don, D.H. Vaughan, J.S. Cundiff and W.F. Wilcke,1989. Thin layer drying rates of Virginia-type peanuts. ASAE Paper. No.89-6600 St. Joseph, MI.

26. Li, H. and R.V. Morey. 1984. Thin-layer drying of yellow dent corn. Trans. of ASAE 27 : 581-585.
27. Li, Y., R.V. Morey and M. Afinrud. 1987. Thin-layer drying rates of oilseed sunflower. Trans. of ASAE 30 : 1172-1175, 1180.
28. Lu, R and T.J. Siebenmorgen. 1992. Moisture diffusivity of long-grain rice components. Trans of ASAE 35(6) : 1955-1961.
29. Moreira, R.G. and F.W. Bakker-Arkema.1989. Moisture desorptiong model for nonpareil Almonds. JAER 42 : 123-133.
30. Muhidong, J., L.H. Chen and D.B. Smith. 1992. Thin-layer drying of kenaf. Trans. of ASAE 35(6) : 1941-1944.
31. Noomhoum, A. and L.R. Verma. 1986. Generalized single-layer rice drying models. Trans. of ASAE 29 (2) : 587-591.
32. Osborn, G.S., G.M. White and L.R. Walton. 1988. Thin-layer moisture adsorption equation for soybeans. Trans. of ASAE 34(1) : 201-206.
33. Page, C. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Unpublished M.S. Thesis. Purdue University, Lafayette, IN.
34. Patil, R.T., S. Sokhansanj, E.A. Arinze and G. Schoenau.1992. Thin layer drying of componints of fresh alfalfa. Canadian Agricultural Engineering 34(4) : 343-346.
35. Patil, R.T, S. Sokhansanj, E.A. Arinze and G.J. Schoenan.1993. Methods of expediting drying rates of chopped alfalfa. Trans. of ASAE 36(6) : 1799-1803.
36. Parti, M. and I. Dugmaics. 1990. Diffusion coefficient for corn drying. Trans. of ASAE 33 : 1652-1656.
37. Parry, J.L. 1985. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying : A review. JAER 32 : 1-29.
38. Pathak, P.K., Y.C. Agrawal and B.P.N. Singh. 1991 · Thin-layer drying mokel for rapeseed. Trans. of ASAE 34(6) : 2505-2508.
39. Radajewski, T. Jensen, G.Y. Abawi and E.J. Mc Gahan. 1992. Drying rate and damage to navy beans. Trans. of ASAE 35(2) : 583-590.
40. Shatadal, P., D.S. Jayas and N.D.G. White. 1990.Thin-layer rewetting characteristics of Canola. Trans. of ASAE 33(3) : 871-876.
41. Sharaf-Eldeef Y.I., M.Y. Hamdy and J.L. Blaisdell.1979. Falling rate drying of full explosed biological materials : a review of mathematical model. ASAE Paper No : 79-6522. ASAE. St. Joseph, MI.
42. Sharaf-Eldeen, Y.I., J.L. Blaisdell and M.Y. Handy.1980. A model for ear corn drying. Trans. of ASAE 23 : 1261-1271.
43. Syarief, A.N., R.V. Morey and R.J. Gustafson. 1984. Thin- layer drying rates of sunflower seed. Trans. of ASAE 27 : 195-200.
44. Sharm, A.D., O.R. Kunre and H.D. Tolley. 1982. Rough rice drying as a two-compartment model. Trans. of ASAE 25 : 221-224.
45. Tang, J., S. Sokhansanj and F.W. Sosulki. Thin-layer drying of lentil. ASAE Paper No. 89-6607. ASAE. St. Joseph, MI.
46. Thompson, T.L., R.M. Peart and G.H. Foster. 1968 · Mathematical simulation of corn drying : a new model. Trans. of ASAE 11(2) : 582-586.
47. Weisberg, S. 1982. Applied linear regression. 2nd. ed. New York : John Willy & Sons.
48. White, G.M., T.C. Bridges, O.J. Loewer and I. J. Ross.1981. Thin-layer drying model for soybeans. Trans of ASAE 24 : 1643-1646.

Study on the Thin-layer Drying Model for Rough Rice[1]

Chia-Chung Chen and Chih-Tsu Tsao[2]

Summary

The information of the thin-layer drying is very important to the simulation of drying and aeration systems. In this study, the thin-layer drying tests were executed for rough rice (Variety : Tainung No.67) in the temperatrue range of 35°C to 60°C at five relative humidities (10 to 50%) .The accurate measurement of thin-layer drying data were taken by the experimental device which modified from the precision humidity generators. The temperature and relative humidity of drying air were controlled by mixing of two air streams. One was absolutely dried and the other was saturated with water vapor. The time controller was adopted to control the weighing action of electronic balance at the temporal resting priod of drying test. The signal of weighing device was transferred to the recorder then converted into numerial values of moisture content for grains. The fitting-agreements of the observed values with the four thin-layer equations were examined by the statistical regression technique. Correlation coefficience and residuals plot were used as criteria for evaluating the fitting-agreement. The two-compartment model with two-term exponential function was found to be the best model to fit the experimental data and was recommended as the thin-layer model for rough rice. The four paramenters of this model were quantified as the function of temperature and relative humidity of drying air.

Key words : Thin-layer, Drying, Model.

1. Contribution No. 1721 from Taiwan Agricultural Research Institute.
2. Associate researcher and Specialist, Departmint of Agricultural Engineering, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.